

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0105

李碧琦,罗海婉,陈文杰,等.基于数值模拟的深圳民治片区暴雨内涝风险评估[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):20-28,63. LI B Q, LUO H W, CHEN W J, et al. Risk assessment of rainstorm waterlogging based on numerical simulation in Shenzhen Minzhi district[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 20-28, 63. (in Chinese)

基于数值模拟的深圳民治片区暴雨内涝风险评估

李碧琦¹, 罗海婉¹, 陈文杰¹, 王玮琦¹, 黄国如^{1,2,3}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640; 3. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心, 广州 510640)

摘要:以深圳市民治片区为研究对象,建立了基于 SWMM 模型和二维水动力学模型的城市雨洪水文水动力耦合模型,并采用历史调研资料对所构建的城市雨洪模型进行验证,结果表明该模型具有良好的精度和可靠性。利用所构建的城市雨洪模型模拟分析民治片区内涝情况,根据致灾因子和受灾体情况建立民治片区内涝风险评估指标体系,利用 ArcGIS 技术和层次分析法对民治片区内涝灾害进行风险评价,风险评价结果表明城市内涝灾害风险主要受淹没情况影响,民治片区高风险区主要集中在民强社区、民治社区、新牛社区内民治河沿河下游区域,低风险区主要分布在远离民治河的民乐社区、民泰社区和大岭社区。

关键词:城市内涝;雨洪模型;层次分析法;风险评估;ArcGIS

中图分类号:P333 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Risk assessment of rainstorm waterlogging based on numerical simulation in Shenzhen Minzhi district

LI Biqi¹, LUO Haiwan¹, CHEN Wenjie¹, WANG Weiqi¹, HUANG Guoru^{1,2,3}

(1. South China University of Technology, School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou 510640, China; 2. South China University of Technology, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on SWMM model and two-dimensional hydrodynamic model, a hydrodynamic coupling model for urban rainwater and flood was established in Shenzhen Minzhi district. The model was validated using historical data. The results showed that the model had good accuracy and reliability. The urban rainflood model was used to simulate and analyze the waterlogging situation in the Minzhi District. According to hazard factors and the affected area, risk assessment index system was established in the study area. ArcGIS technology and analytic hierarchy process method was used to evaluate the risk of waterlogging disaster in Minzhi district. The result of waterlogging risk assessment showed that the risk of waterlogging disasters in the cities was mainly affected by inundation. The high risk region were mainly located in downstream area of Minzhi River inside Minqiang Community, Minzhi Community and Xinniu Community, while the low risk area were mainly distributed in Minle Community, Mintai Community and Daling Community away from Minzhi River.

Key words: urban flood; stormwater model; AHP; risk assessment; ArcGIS

收稿日期:2019-01-26 修回日期:2019-05-06 网络出版时间:2019-08-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190815.1348.004.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1502704);国家自然科学基金(51739011;51879108)

作者简介:李碧琦(1996—),女,湖南岳阳人,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 592212741@qq.com

通信作者:黄国如(1969—),男,江苏南京人,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: huanggr@scut.edu.cn

近年来,城市化和局部强降雨的频繁发生使城市内涝灾害的发生频率与潜在风险不断增加,影响范围也逐渐扩大,给社会经济造成巨大损失,也给城市居民的生命财产安全造成了极大威胁^[1,2]。以深圳市为例,2014年深圳市连续遭受“3·30”“5·8”“5·11”“5·17”“5·20”五场特大暴雨袭击,全市多处发生不同程度的积水或内涝,并造成部分河堤坍塌毁损,多条公交线路暂停运营,机场近百个航班取消,造成巨大的财产损失^[3]。在此背景下,对暴雨洪涝灾害进行科学、合理的风险评估区划尤为重要,国内外许多学者对此进行了相关研究。Pendy等^[4]以印度比哈尔邦为研究区域,利用卫星数据对研究区域的历史内涝进行评价,并且根据历史内涝情况和社会经济特征,得到该地区洪涝灾害风险图。Kubal等^[5]在德国莱比锡采用多准则决策规则,建立综合经济、社会和生态3方面标准的洪涝风险评估方法,基于不同权重集对城市洪涝风险进行评估。胡波等^[6]基于自然灾害风险理论,利用模糊综合评价法和AHP熵权法建立宁波市暴雨洪涝灾害风险区划模型,绘制宁波市暴雨洪涝灾害风险区划图。王林森等^[7]在ArcGIS平台中运用模糊综合评判方法,创建城市暴雨内涝综合风险评估模型,并将模型应用于上海某排水片区。焦圆圆等^[8]以区为单位,从深圳市暴雨洪涝灾害的可能性和后果出发,综合考虑深圳市暴雨洪涝系统特征、承灾体易损性和抗灾能力,对深圳市进行暴雨洪涝风险评估与区划。彭建等^[9]以深圳市茅洲河流域为例,基于土地利用变化对不同暴雨-土地利用情景下的城市洪涝灾害风险进行定量模拟,研究结果显示,相同土地利用空间格局下城市暴雨洪涝灾害风险随暴雨致灾危险性增加显著加剧;在同等致灾危险性水平下中、高等风险区面积随建设用地面积增加呈现较为明显的增加趋势。本文以深圳市民治片区为研究区域,构建基于一维、二维耦合城市洪涝数值模型的城市雨洪模型,模拟分析民治片区积水淹没情况,利用ArcGIS技术和层次分析法建立民治片区内涝风险评估方法,制作内涝灾害危险性、易损性和风险分布图,对该流域内涝灾害进行风险评价,为业务部门快速决策、采取有效措施提供科学依据,实现城市防汛与城市建设及社会经济的协调发展。

1 研究区域概况

民治街道位于深圳市龙华区南部,北邻大浪和龙华街道,东部与深圳市龙岗区相邻,南接福田与罗湖,西靠南山,民治街道位于北回归线以南,属南亚热带海洋性季风气候,年均降雨量为1722 mm,雨

量充沛,辖区总面积29.26 km²,下辖11个社区工作站。根据排水管网服务范围及地形资料概况分析,确定民治街道内一封闭流域作为研究区域,研究区域面积为25.33 km²。研究区域范围内地形南高北低,南部多为丘陵山地,中部和北部地势平缓,为密集建城区。近年来,深圳市民治片区多次遭受暴雨袭击,均发生不同程度内涝,局部区域积水严重,对企业生产和居民生活造成了较大影响。

民治片区地处观澜河流域范围内,片区内两条主要河流上芬水和民治河都属于观澜河一级支流。民治河为观澜河的上游支流,源于民治水库、民乐水库、雅宝水库的源头大脑壳山脉,民治河起点接民治水库溢洪道,沿民治大道由南向北,左岸有牛咀水、樟坑水二支流汇入,在下游松村北侧于坂田河汇合后一同汇入观澜河干流。民治河流域集水面积20.17 km²,蓄水工程控制面积8.72 km²,河流总长8.8 km,河床平均比降6.6‰。上芬水为观澜河左岸支流,发源地为深圳市羊台山森林公园,流经大浪、民治、龙华办事处,在龙华办事处油松社区共和村汇入观澜河,河流全长3.9 km,流域面积8.9 km²。研究区域水系分布见图1。



图1 民治片区水系分布

Fig. 1 River system of Minzhi district

2 研究资料与方法

2.1 资料概况

本文使用的原始数据包括研究区域内的地形资料、排水管网资料、河道水系资料及遥感影像资料等。研究区域地形资料采用1:2000地形图,缺失部分选用克里金法进行插值计算。排水管网资料较

为齐全,对管网资料进行分析,研究区内排水系统主要为分流制排水系统,部分分区为合流制,雨污水经管道收集后排入河道。研究区内有上芬水、民治河及樟坑水、牛咀水支流共四条河流水系,河流断面资料较好。研究区域采用 18 级的遥感影像图影像,能清晰识别屋顶、道路、绿地等下垫面信息。

2.2 城市洪涝数值模型

本文所采用的城市雨洪模型主要耦合了 SWMM 模型和地表二维模型。其中,SWMM 模型是集水文、水力和水质模拟功能于一体的降雨径流模拟模型^[10-11],主要用来计算地下一维管网的水流情况,当地下管网排水能力不足时,水流会从地下管网溢流到地表,造成明显的地面积水或者地表行洪等现象。在大多数情况下,地表及沿海近岸水流运动通常为浅水运动,即重力作用下具有自由表面的浅水体的流动,可以用二维浅水方程描述。二维浅水方程可以由 Navier-Stokes 方程在垂直方向上积分简化后得到,能够满足工程实践中绝大部分的应用需求,并已广泛应用于国内外浅水研究^[12-13]。因此,基于 Navier-Stokes 方程推导二维浅水流动控制方程^[14]。二维浅水方程属于双曲型偏微分方程,基于目前的数学理论无法求解其精确的解析解,只能通过数值方法求解其近似解。基于非结构网格的 Godunov 型有限体积法^[15],将 Jameson^[16]提出的隐式双时间步法应用于求解二维浅水方程,建立适用于城市区域的二维水动力学模型,处理实际洪水问

题。双时间步法的主要思想是采用两个时间步:物理时间步和虚拟时间步,将所求解问题在每一时间步上转化为一个定常问题进行迭代求解。对于虚拟时间步上的定常问题,采用 LU-SGS(lower-upper symmetric Gauss-Seidel)隐式格式^[17]进行迭代求解。单元界面处的对流数值通量计算是基于有限体积法的水动力学模型的基础,采用实现难易程度相对较低、精度和效率都较高且能够自动适应干湿界面的 HLLC 黎曼求解器^[18]求解界面通量。

在前述的 SWMM 模型以及二维非恒定流水动力学模型的基础上,研究一维模型和二维模型在水平方向和垂直方向上的耦合问题,建立一维、二维耦合的城市洪涝数值模型^[19]。一二维模型在水平方向的耦合连接,即地表一二维模型耦合,主要是针对河道与地面的水流交换问题,见图 2(a)。本模型采用较为简单、使用最为广泛的堰流公式法^[20]来计算侧向连接的水流交换问题,正向连接则采用互为提供边界条件^[21]的方式,互相提供边界法采用一二维模型互为对方提供边界条件的思想,该方法无需额外的计算,比较容易实现。一二维模型在垂直方向的耦合连接,即一二维模型地表地下耦合,主要是针对城市地下排水管网与地面的水流交换问题,见图 2(b)。垂向连接的计算方法目前主要包括堰流公式法或简化的堰流公式法,孔口出流法或其它简化公式^[22]。本模型主要采用堰流公式和孔口出流公式计算交换的水量。

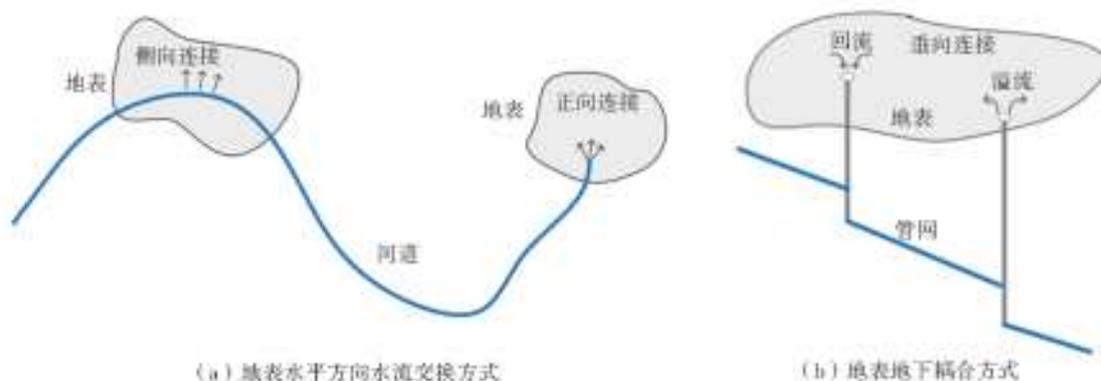


图 2 水流交换方式

Fig. 2 Schematic diagram of flow exchange mode

2.3 暴雨内涝风险评估方法

城市暴雨内涝灾害是自然界洪水对人类社会的影 响,是人与自然关系的一种体现^[23]。内涝风险描述自然界洪水对人类社会及其生存环境所造成危害或不利影响的可能性及不确定性。洪灾风险理论认为洪灾风险是洪水危险性和社会经济易损性的综合函数,本文采用 Marskey^[24]于 1989 年提出的自然

灾害风险表达式(风险=危险性+易损性)对研究区域进行城市内涝风险评估。

内涝风险评估是根据研究区城市内涝特征,基于内涝风险的自然属性和社会属性,分析评价城市内涝危险性和易损性等,将研究区域划分为不同风险等级,并为其编制风险图。内涝风险评估通常涉及多种影响因素,例如天气因素、下垫面

因素、社会经济因素等,层次分析法可以把复杂的风险评估问题条理化,层次化,较好地解决内涝风险评估问题。运用层次分析法^[25-26]将复杂问题中的各种因素划分为相互联系的有序层次,通过成对比较构造判断矩阵,再通过求判断矩阵特征向量确定各层次中各因素权重。AHP层次结构模型分为目标层、准则层、指标层和变量层。本文将目标层定义为城市内涝灾害风险指数,准则层选取危险性和易损性两个指标,指标层选用致灾因子、孕灾环境、承灾体和防灾减灾能力等指标,变量层选取淹没水深、地面高程、人口密度等指标作为子因子。

3 城市洪涝模型模拟

3.1 城市洪涝模型构建

针对深圳市内面积为 25.33 km² 的民治片区建立一维、二维耦合的城市洪涝数值模型。其中,研究区域一维模型也就是 SWMM 模型具体构建过程详见文献^[27],研究区域排水系统概化见图 3。SWMM 模型中的特征参数可根据研究区域的

实际情况予以事先确定^[27],比如管道长度、管径、流域面积和坡度等,其他一些模型参数如透水区曼宁系数、不透水区曼宁系数及霍顿产流参数等,则需根据 SWMM 使用手册和相关文献确定^[28],选用霍顿模型模拟研究区域内的下渗过程,动力波法进行流量传输计算,模型经验参数见表 1。



图 3 研究区域排水系统概化

Fig. 3 Generalization of drainage system in study area

表 1 SWMM 模型经验参数取值

Tab. 1 Empirical parameters of SWMM model

参数	子汇水区				不透水区中无注不透水面积比例/%	霍顿模型		
	不透水区曼宁系数	透水区曼宁系数	不透水区注蓄深/mm	透水区注蓄深/mm		最大下渗率/(mm·h ⁻¹)	最小下渗率/(mm·h ⁻¹)	渗透衰减系数/(h ⁻¹)
参数值	0.011	0.24	2.5	5	25	78.1	3.3	3.35

本文使用的城市洪涝模型实现了一维、二维模型的耦合,一维模型主要用于进行河道和城市地下排水管网水流模拟计算,二维模型则主要用来对地面洪水的流速、流向和深度进行模拟计算。建立二维模型首先确定建筑物及河道概化方式,确定二维计算区域。由于研究区域内建筑密集,建筑物在实际中是不可积水区域,根据遥感图划出建筑物轮廓,并在模拟范围中将建筑物排除在外。同时,河道也是不可积水区域,而且本模型已在一维计算中考虑了河道,因此,也将河道排除在二维模型模拟范围之外,研究区域内建筑与道路概化图见图 4。二维区间在模型中的作用是进行网格划分,对容易积水的城市道路地区采用最大 1 m² 非结构网格进行网格划分,以便于更加精细地模拟出道路积水分布情况,而对于道路之外的区域,模型采用最大 100 m² 的网格进行划分,加快计算速度。建立二维模型最后一步是引入地面高程模型,将地面高程赋值到划分好的网格中。

本模型采用的高程数据为高密度的高程点数据,为防止高程点数据误差对模拟造成不利影响,使用 ArcGIS 软件建立 TIN 模型并进行人工修正,再将地面高程模型引入模型。



图 4 研究区域内建筑与道路

Fig. 4 Buildings and rivers in study area

3.2 模型率定和验证

采用 2013 年 8 月 30 日及 2014 年 5 月 11 日的两场降雨内涝资料对模型进行率定和验证,降雨资料来自民治片区自记式雨量计。由于缺乏流域出口

实测流量数据,采用实地调查内涝情况进行模型参数率定。

提取结果文件中民治河及上芬水河口流量过程,绘制出口降雨径流过程线见图 5。

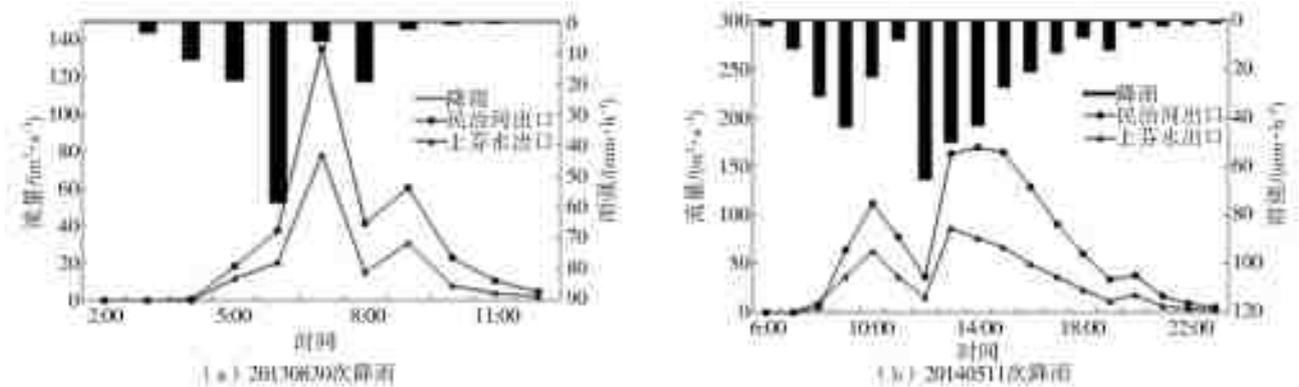


图 5 20130830 和 20140511 次降雨模型模拟出口流量过程

Fig. 5 Simulated rainfall runoff processes in 20130830 and 20140511

由降雨径流过程线可知,流域出口的流量过程线与降雨过程变化规律一致,流量峰值滞后于降雨峰值,且河口洪峰流量与降雨强度表现出较高的相关性,河口洪峰流量随降雨峰值强度增大而增大。可判断模拟结果符合城市雨洪过程基本规律。

根据历史内涝积水调研情况,2014 年 5 月 11 日场次的暴雨造成内涝积水较为严重的区域主要为民治大道沙吓村段、民治河边梅花新园、民治大道平南铁路下等区域。提取结果文件中的城市地表积水分布,将 20140511 场次暴雨主要涝点的调研水深和模拟淹没水深比较,结果见表 2。由表 2 可知,模型模拟积水情况与调查结果较为一致,说明该模型能较好地反应该片区的内涝情况,具有一定可靠性。

经济易损性两方面出发选择内涝灾害风险评估指标^[29]。选择淹没深度、淹没历时、地面高程、坡度 4 个指标来进行内涝灾害危险性评价,采用人口密度、土地利用及距医院距离 3 个指标作为内涝灾害易损性评价指标。需要说明的是,根据《城镇内涝防治技术规范》GB 51222—2017 要求,深圳市防御内涝标准为 100 a 一遇,因此,本文利用所构建的城市雨洪水文水动力耦合模型计算 100 a 一遇设计暴雨情况下研究区域淹没水深和淹没历时。

根据深圳市暴雨强度公式和芝加哥雨型生成设计暴雨,取雨峰系数 r 为 0.417^[28]。选取降雨历时 120 min,并以 5 min 为一记录间隔,得到降雨历时 2 h 的深圳市 100 a 一遇设计暴雨见图 6。

表 2 20140511 场次暴雨主要涝点积水统计

Tab. 2 Statistical results of waterlogging points at

20140511 rainstorms		单位:cm	
涝点位置	调研水深	模拟水深	误差
民治大道沙吓村段	130	127	3
民治河边梅花新园	130	126	3
民治大道平南铁路下	50	50	0
布龙路与人民路交汇处	60	54	6
临龙路	40	40	0
梅坂大道万家灯火	60	44	16

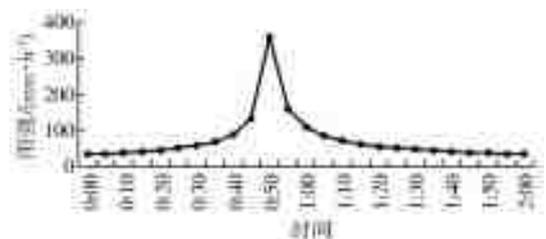


图 6 100 a 一遇设计降雨过程线

Fig. 6 Rainfall process under 100 years return period

4 民治片区内涝风险评估

4.1 暴雨内涝风险评价指标体系构建

在对研究区域进行实地考察和特征分析的基础上,综合考虑致灾因子、孕灾环境、承灾体等因素,借鉴国内外常用指标,分别从城市内涝危险性和社会

采用层次分析法(AHP)确定各评价指标权重值,表 3 为采用 AHP 法求得的民治片区内涝风险评估各指标权重。

4.2 暴雨内涝风险评价指标量化

本文选取的各评价指标计量单位不同,取值范围变幅大,因此对数据进行标准化处理。利用 ArcGIS 10.1 将各指标数据图层作 10 m×10 m 解析度的栅格化处理,采用自然间断点重分类法对各指

表 3 内涝风险评估各指标权重

Tab. 3 weights of indicators for waterlogging risk assessment

目标层	准则层	指标层	变量层	数据来源	变量层权重	准则层权重
城市内涝灾害	危险性	致灾因子	淹没水深	城市雨洪模型模拟结果	0.54	0.67
			淹没历时	城市雨洪模型模拟结果	0.26	
		孕灾环境	地面高程	1:2 000 地形图	0.10	
			坡度	根据高程数据	0.10	
	易损性	承灾体	人口密度	龙华政府在线	0.63	0.33
			土地利用	深圳中部土地利用规划图	0.26	
	防灾减灾能力	距医院距离	深圳中部土地利用规划图	0.11		

标图层进行栅格重分类,并分别按数值 1、2、3、4 代表低、中、较高、高风险等级对每个 10 m×10 m 的栅格单元赋值,见表 4。各指标因子风险等级分布见图 7。

4.3 城市内涝风险评价

4.3.1 研究区域内涝危险性评价

本文采用的城市内涝灾害危险性指标为淹没水深、淹没历时、地面高程和坡度,基于各指标风险等

表 4 各指标风险等级划分与赋值

Tab. 4 Risk classification and evaluation of each index

指标层	变量层	风险等级			
		1	2	3	4
致灾因子	淹没水深/m	<0.15	0.15~0.5	0.5~1.5	>1.5
	淹没历时/h	<1	1~2	2~3	3~4
孕灾环境	地面高程/m	172.35~345.47	113.62~172.35	81.47~113.62	43.87~81.47
	坡度/%	0~3.10	3.10~7.53	7.53~13.91	13.91~53.61
承灾体	人口密度/(万人·km ²)	0~1.967	1.967~3.526	3.526~4.586	4.586~11.051
	土地利用类型	绿地	行政	住宅	商业
防灾减灾能力	距医院距离/km	0~1.08	1.08~1.88	1.88~2.72	2.72~3.93

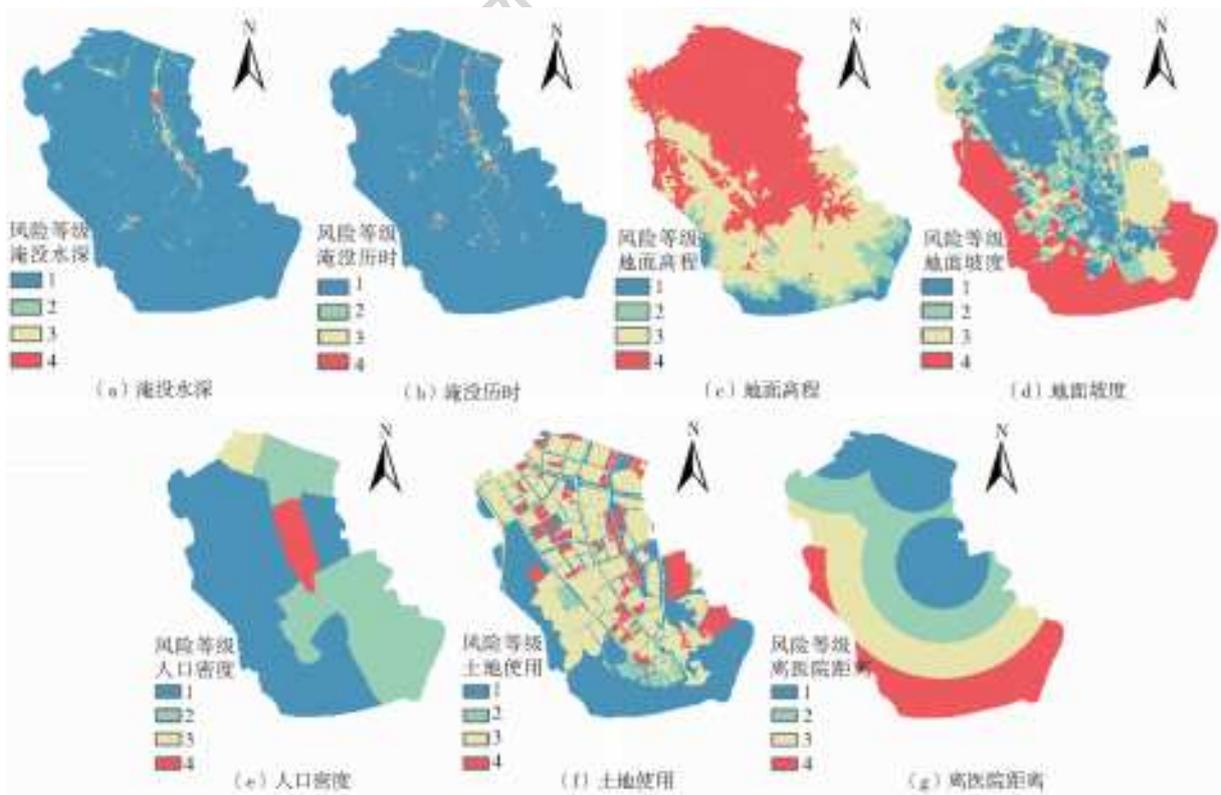


图 7 民治片区内涝风险评估指标等级分布

Fig. 7 Distribution of waterlogging risk assessment index in Minzhi district

级划分结果,将各危险性指标标准化处理后的数字图层乘以相应的权重,每个栅格单元的危险性 H 和各变量层风险等级 w_i 的关系如式(1)所示。

$$H=0.54w_1+0.26w_2+0.1w_3+0.1w_4 \quad (1)$$

利用 ArcGIS 自然间断点重分类方法,将危险性计算结果分别按 $1.10 \sim 1.66$ 、 $>1.66 \sim 2.38$ 、 $>2.38 \sim 3.06$ 和 $>3.06 \sim 4.00$ 将各 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的栅格单元危险性计算结果划分为低、中等、较高、高危险性,并分别赋值 1、2、3、4 得到民治片区内涝灾害危险性分布,见图 8。由图 8 可知,研究区域内涝灾害危险性高和较高区域主要分布在民治河沿河下游附近和上芬社区布龙路一带,这是由于淹没水深为最主要因素,影响程度所占比重最大,这些区域地下排水管网标准较低,排水沟渠断面过水能力不足^[27],淹没情况较为严重,地势较低且坡度平缓,不利于汇集的城市洪水排出;北站社区深圳北站附近坡度较大,高程偏小,有利于城市洪水在低洼地区汇集,因此发生内涝的危险性也较大;危险性较低区域主要分布在大岭社区、白石龙社区、民泰社区、民乐社区等。



图 8 民治片区内涝灾害危险性分布

Fig. 8 Waterlogging hazard distribution in Minzhi District

4.3.2 研究区域内涝易损性评价

本文采用的内涝灾害易损性指标有人口密度、土地利用和距医院距离,基于各指标危险度划分结果,将各易损性指标标准化处理后的数字图层与对应权重相乘,每个栅格单元的易损性 V 和各变量层风险等级 w_i 的关系如式(2)所示。

$$V=0.63w_1+0.26w_2+0.11w_3 \quad (2)$$

利用 ArcGIS 自然间断点重分类方法,将危险性计算结果分别按 $1.00 \sim 1.37$ 、 $>1.37 \sim 2.00$ 、

$>2.00 \sim 2.78$ 和 $>2.78 \sim 3.28$ 将各 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的栅格单元易损度计算结果划分低、中等、较高、高易损性,并分别赋值 1、2、3、4,由此得到民治片区城市灾害易损性分布见图 9。由图 9 可知,民治片区内涝灾害易损性较高区域主要分布在研究区域中部和北部,即民强社区、樟坑社区、上芬社区和大岭社区东部等,这主要是因为这些区域地势平缓,为密集建城区,土地利用类型主要为商业和住宅用地,人口密度大;民乐社区南部有大片山地,易损性程度较低,但北部土地利用类型主要为住宅和商业用地,且距离研究区域内综合医院较远,因此易损性程度也较高。

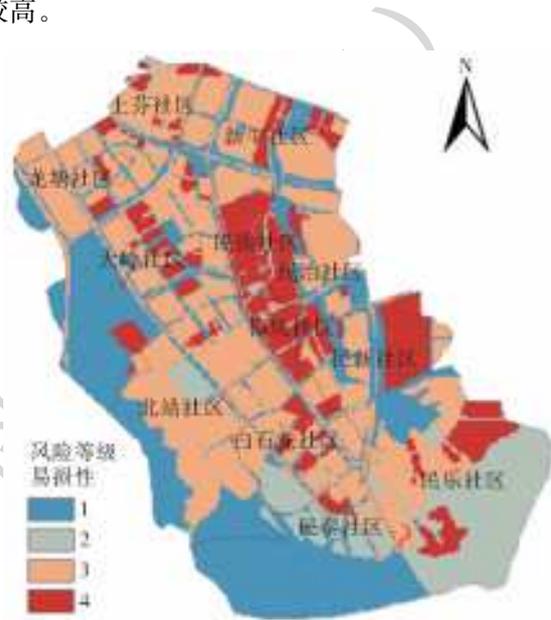


图 9 民治片区内涝灾害易损性分布

Fig. 9 Waterlogging vulnerability distribution in Minzhi District

4.3.3 研究区域内涝风险评价

在民治片区城市内涝风险评估中,危险性 H 和易损性 V 的权重分别为 0.67 和 0.33,在 ArcGIS 10.1 平台上根据式(3)将内涝危险性因子和易损性因子进行空间叠加分析,计算每个栅格单元的风险度 R ：

$$R=0.67H+0.33V \quad (3)$$

同时基于自然间断点重分类法,将风险度计算结果分别按 $1.13 \sim 1.66$ 、 $>1.66 \sim 1.95$ 、 $>1.95 \sim 2.36$ 和 $>2.36 \sim 3.62$ 将各 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的栅格单元风险计算结果划分为低、中等、较高、高风险,并分别赋值 1、2、3、4,得到民治片区城市内涝风险分布见图 10。

结合民治片区内涝危险性分布图、易损性分布图及风险分布图可知,研究区域城市内涝高风险区主要集中在民强社区、民治社区、新牛社区内民治河沿河下游附近,这是由于这些地区淹没情况较为严重,地势较低,有利于地表洪水汇集,人口相对密集,

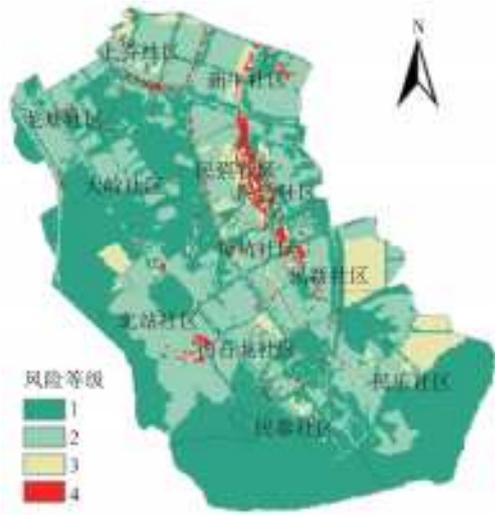


图 10 民治片区内涝灾害风险分布

Fig. 10 Waterlogging risk distribution in Minzhi District

居民点较为集中,城市化程度较高,土地利用类型主要为商业及住宅用地,经济财产相对集中,因此发生城市内涝的风险比其他地区相对较高;较高风险区及中风险区主要集中在研究区域中部及北部,这些地区稍远离民治河,但地势较低,地形起伏度较小,同时人口密度较大,因此城市内涝风险程度较高;风险低的地区分布面积较为广泛,主要集中在地势较高及远离民治河的民乐社区、民泰社区和大岭社区,因为这些地方内涝危险性相对较低,且人口和经济分布稀疏,故整体城市内涝风险性较小。

5 结 论

(1)构建基于一维、二维耦合的民治片区城市雨洪模型,选用 2 场实测降雨资料验证该模型,模拟降雨径流过程线符合城市雨洪过程基本规律,且模型模拟的积水区域和深度与实地调研的积水区域和深度较为一致,表明该模型具有良好的精度和可靠性。

(2)民治片区高风险区主要集中在地势较为平缓、人口较多、经济较为发达、内涝灾害危险性高的民治河下游沿河区域,较高风险区集中在内涝灾害易损性较高的研究区域中部和北部的居民集中区,风险度较低区域主要集中在地面高程较高以及人口较为稀疏的民治片区南部和西部,评价结果与民治片区内涝风险实际情况较为吻合。

(3)结合民治片区内涝危险性分布图、易损性分布图及风险分布图可发现,城市内涝灾害风险评估中淹没水深为最主要因素。因此,将城市洪涝模型与风险理论相结合进行内涝情景模拟,模拟分析城市区域积水淹没情况,可以较大程度地提高城市内涝风险评估的精细化程度,使城市内涝灾害风险管

理事半功倍。

参考文献(References):

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG J Y, SONG X M, WANG G Q, et al Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. Hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2014.04.020.
- [2] 黄国如,王欣,黄维. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 66-70, 60. (HUANG G R, WANG X, HUANG W. Simulation of rainstorm water logging in urban area based on InfoWorks ICM model [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2): 66-70, 60. (in Chinese))
- [3] 马晋毅. 深圳市内涝形成原因分析与治涝对策研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(2): 105-111. (MA J Y. Analysis on the causes of waterlogging in Shenzhen and study on the countermeasures against waterlogging [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(2): 105-111. (in Chinese)) DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2015.02.024.
- [4] PANDEY A C, SINGH S K, NATHAWAT M S. Waterlogging and flood hazards vulnerability and risk assessment in Indo Gangetic plain [J]. Natural Hazards, 2010, 55(2): 273-289. DOI: 10.1007/s11069-010-9525-6.
- [5] KUBAL C, HAASE D, MEYER V, et al. Integrated urban flood risk assessment—adapting a multicriteria approach to a city [J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2009, 9(6): 1881-1895. DOI: 10.5194/nhess-9-1881-2009.
- [6] 胡波,丁焯毅,何利德,等. 基于模糊综合评价的宁波暴雨洪涝灾害风险区划[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(4): 380-385. (HU B, DING Y Y, HE L D, et al. Risk division of rainstorm and water-logging disasters in Ningbo City based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Torrential Rain and Disasters, 2014, 33(4): 380-385. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.04.010.
- [7] 王林森,熊小兰,柯庆,等. 基于 GIS 空间分析建模技术的内涝风险评估[J]. 中国给水排水, 2017, 33(3): 115-118. (WANG L S, XIONG X L, KE Q, et al. GIS-based spatial analysis modeling techniques for urban flooding risk assessment[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(3): 115-118. (in Chinese))
- [8] 焦圆圆,谢志高. 深圳市暴雨洪涝灾害风险评估与区划

- [J]. 中国农村水利水电, 2014(1):77-80. (JIAO Y Y, XIE Z G. Risk assessment and regionalization of rainstorm and flood disaster in Shenzhen[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(1):77-80. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2014.01.020.
- [9] 彭建, 魏海, 武文欢, 等. 基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估——以深圳市茅洲河流域为例[J]. 生态学报, 2018, 38(11):3741-3755. (PENG J, WEI H, WU W H, et al. Storm flood disaster risk assessment in urban area based on the simulation of land use scenarios: A case of Maozhou Watershed in Shenzhen City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(11):3741-3755. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201708271546.
- [10] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual version 5. 1-manual[R]. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency, 2015.
- [11] ROSSMAN L A, HUBER W C. Storm water management model reference manual volume i, hydrology[R]. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency, 2016.
- [12] 曹引, 冶运涛, 梁犁丽, 等. 基于结构网格的溃坝水流数值模拟[J]. 水科学进展, 2017, 28(6):868-878. (CAO Y, YE Y T, LIANG L L, et al. Numerical simulation of dam-break flow based on structured grids[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6):868-878. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.06.008.
- [13] XIA X, LIANG Q, MING X, et al. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations[J]. Water Resources Research, 2017, 53(5):3730-3759. DOI: 10.1002/2016WR020055.
- [14] 喻海军. 城市洪涝数值模拟技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. (YU H J. Research on numerical simulation technology of urban floods[D]. South China University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [15] ALCRUDO F, GARCIA NAVARRO P. A high-resolution Godunov-type scheme in finite volumes for the 2D shallow-water equations[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1993; 16(6):489-505. DOI: 10.1002/flid.1650160604.
- [16] JAMESON A. Time dependent calculations using multigrid, with applications to unsteady flows past airfoils and wings [C]. Computational Fluid Dynamics Conference, 1991. DOI: 10.2514/6.1991-1596.
- [17] JAMESON A, YOON S. Lower-upper implicit schemes with multiple grids for the Euler equations[J]. AIAA journal, 1987; 25(7):929-35. DOI: 10.2514/3.9724.
- [18] MURILLO J, GARCÍA-NAVARRO P. Augmented versions of the HLL and HLLC Riemann solvers including source terms in one and two dimensions for shallow flow applications[J]. Journal of Computational Physics, 2012; 231(20):6861-906. DOI: 10.1016/j.jcp.2012.06.031.
- [19] CHEN W, HUANG G, ZHANG H, et al. Urban inundation response to rainstorm patterns with a coupled hydrodynamic model: A case study in Haidian Island, China[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564:1022-1035. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.069.
- [20] DUTTA D, ALAM J, UMEDA K, et al. A two-dimensional hydrodynamic model for flood inundation simulation: a case study in the lower Mekong river basin[J]. Hydrological Processes, 2010, 21(9):1223-1237. DOI: 10.1002/hyp.6682.
- [21] GHOSTINE R, VAZQUEZ J, TERFOUS A, et al. A comparative study of 1D and 2D approaches for simulating flows at right angled dividing junctions[J]. Applied Mathematics and Computation, 2013, 219(10):5070-5082. DOI: 10.1016/j.amc.2012.11.048.
- [22] BAZIN P H, NAKAGAWA H, KAWAIKE K, et al. Modeling flow exchanges between a street and an underground drainage pipe during urban floods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(10):401-405. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000917.
- [23] 高吉喜, 潘英姿, 柳海鹰, 等. 区域洪水灾害易损性评价[J]. 环境科学研究, 2004(6):30-34. (GAO J X, PAN Y Z, LIU H Y, et al. Assessment on regional vulnerability to flood[J]. Research of Environmental Sciences, 2004(6):30-34. (in Chinese)) DOI: 10.13198/j.res.2004.06.32.gaojx.008.
- [24] MARSKEY A. Disaster Mitigation: A community based approach[M]. Oxfam GB, 1989.
- [25] 尹占娥. 城市自然灾害风险评估与实证研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009. (YIN Z E. Research of urban natural disaster risk assessment and case study[D]. School of Resources and Environment Science, 2009. (in Chinese))
- [26] 曾家俊, 黄华爱, 刘松, 等. 广西德保岩溶内涝灾害风险评估[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1):70-74. (ZENG J J, HUANG H A, LIU S, et al. Risk assessment of karst waterlogging disaster in Debao County of Guangxi[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(1):70-74. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2016.01.12.

(下转第 63 页)

- DAI J F. A water level prediction model of Hongze Lake[J]. Computer Simulation, 2009, 26(4): 113-115, 157. (in Chinese))
- [13] TIAN Y, XU Y-P, YANG Z, et al. Integration of a parsimonious hydrological model with recurrent neural networks for improved streamflow forecasting [J]. Water, 2018, 10 (11): 1655. DOI: 10. 3390/w10111655.
- [14] 柴琳娜, 屈永华, 张立新, 等. 基于自回归神经网络的时间序列叶面积指数估算[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 756-768. (CHAI L N, QU Y H, ZHANG L X, et al. Estimating time series leaf area index based on recurrent neural networks [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(7): 756-768. (in Chinese))
- [15] Lin T, Horne B G, Tino P, et al. Learning long-term dependencies in NARX recurrent neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1996, 7(6): 1329-1338. <https://doi.org/10.1109/72.548162>.
- [16] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展, 2013, (9): 1413-1422. (SANG Y F, WANG Z G, LIU C M. Applications of wavelet analysis to hydrology: Status and prospects [J]. Progress in Geography, 2013, 32 (9): 1413-1422. (in Chinese))
- [17] GB/T 22482—2008 水文情报预报规范[S]. (GB/T 22482—2008 Specification for Hydrological Information Forecasting[S]. (in Chinese))
- [18] 虞邦义, 郁玉锁. 洪泽湖泥沙淤积分析[J]. 泥沙研究, 2010 (6): 36-41. (YU B Y, YU Y S. Sediment deposition in Hongze Lake [J]. Journal of Sediment Research, 2010 (6): 36-41. (in Chinese)) DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2010. 06. 005.
- [19] SUDHEER K P, GOSAIN A K, RAMASASTRI K S. A data-driven algorithm for constructing artificial neural network rainfall-runoff models [J]. Hydrological Processes, 2002, 16 (6): 1325-1330. DOI: 10. 1002/hyp. 554.
- [20] HORNIK K, STINCHCOMBE M, WHITE H. Multilayer feedforward networks are universal approximators [J]. Neural Networks, 1989, 2(5): 359-366. DOI: 10. 1016/0893-6080(89)90020-8.
- [21] NOURANI V, ALAMI M T, AMINFAR M H. A combined neural-wavelet model for prediction of watershed precipitation, Ligvanchai, Iran [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008, 22 (3): 466-472. DOI: 10. 1016/j. engappai. 2008. 09. 003.
- [22] BEN TAIEB S, BONTEMPI G, ATIYA A F, et al. A review and comparison of strategies for multi-step ahead time series forecasting based on the NN5 forecasting competition [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(8): 7067-7083. DOI: 10. 1016/j. eswa. 2012. 01. 039.
- [23] 肖幼. 淮河防总 2017 年工作报告 [J]. 治淮, 2017, 2017(5): 7-10. (XIAO Y. 2017 work report of the Huai River flood control and drought relief headquarters [J]. Zhi Huai, 2017, 2017(5): 7-10. (in Chinese))

(上接第 28 页)

- [27] 黄国如, 张灵敏, 雒翠, 等. SWMM 模型在深圳市民治河流域的应用 [J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 10-14. (HUANG G R, ZHANG L M, LUO C, et al. Application of SWMM model in Minzhi River basin of Shenzhen City [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(4): 10-14. (in Chinese))
- [28] 胡爱兵, 任心欣, 丁年, 等. 基于 SWMM 的深圳市某区域 LID 设施布局与优化 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(21): 96-100. (HU A B, REN X X, DING N, et al. LID facilities layout and optimization in an area in Shenzhen based on SWMM [J]. China Water & Wastewater, 2015, (21): 96-100. (in Chinese))
- [29] 黄国如, 洗卓雁, 成国栋, 等. 基于 GIS 的清远市瑶安小流域山洪灾害风险评价 [J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 43-47. (HUANG G R, XIAN Z Y, CHENG G D, et al. Risk assessment of mountain torrent disaster at Yaoan small watershed in Qingyuan city based on GIS Technique [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(6): 43-47. (in Chinese))